

· 综 述 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2024.23.020

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240903.1034.012\(2024-09-03\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240903.1034.012(2024-09-03))

1 型神经纤维瘤病性脊柱侧凸矫形术中椎弓根螺钉置钉安全性研究进展*

王文博, 汤三泉, 李国军, 陈焕雄[△]

(海南医学院第一附属医院脊柱外科, 海南海口 570100)

[摘要] 神经纤维瘤病(NF)作为一种常染色体显性遗传疾病,常累及全身多个系统,分为1型与2型NF。神经纤维瘤病性脊柱侧凸(NFS)主要为1型,1型神经纤维瘤病性脊柱侧凸(NF1-S)在脊柱解剖学及形态学上表现为顶椎旋转和椎弓根形态异常,导致侧凸矫形术中椎弓根螺钉置入难度与风险极大。为提高手术安全性,该文深入探讨NF1-S患者的椎弓根形态学及解剖学结构,分析不同椎弓根螺钉辅助置入技术的精确性和安全性,为临床手术提供参考,促进治疗水平提升。

[关键词] 1型神经纤维瘤病性脊柱侧凸;椎弓根异常;术中计算机导航;3D超声;3D打印导板

[中图分类号] R687.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2024)23-3633-06

Research progress on pedicle screw placement safety in orthopedic treatment of type 1 neurofibromatosis scoliosis*

WANG Wenbo, TANG Sanquan, LI Guojun, CHEN Huanxiong[△]

(Department of Spinal Surgery, First Affiliated Hospital, Hainan Medical University, Haikou, Hainan 570100, China)

[Abstract] Neurofibromatosis (NF) as an autosomal dominant disease usually involves multiple systems throughout the body and is classified as type 1 or type 2 NF. Neurofibromatosis scoliosis (NFS) is mainly type 1, and severe neurofibromatosis scoliosis type 1 (NF1-S) is manifested by abnormalities in spinal anatomy and morphology, such as rotation of the parietal vertebrae and abnormal morphology of the pedicles, which leads to the difficulty and maximal risk of pedicle screw placement in scoliosis orthopedic surgery. In order to improve the safety of surgery, this paper discusses the morphology and anatomical structure of the pedicles in the patients with NF1-S, and analyzes the accuracy and safety of different pedicle-assisted screw placement techniques to provide reference for clinical surgery and promote the improvement of treatment level.

[Key words] type 1 neurofibromatosis scoliosis; pedicle root anomalies; intraoperative computerized navigation; 3D ultrasound; 3D printed guides

神经纤维瘤病(neurofibromatosis, NF)是一种常累及全身多个系统的常染色体显性遗传性疾病^[1]。1型NF是引起神经纤维瘤病性脊柱侧凸(neurofibromatosis induced scoliosis, NFS)的主要原因,约有60%的NF患者会引起骨骼肌肉系统病变,导致脊柱侧凸^[2]。在1型NF引起的脊柱侧凸中,又分为营养不良型与非营养不良型,其中营养不良型脊柱侧凸预后较非营养不良型更差,治疗难度更大^[3]。1型神经纤维瘤病性脊柱侧凸(type 1 neurofibromatosis induced scoliosis, NF1-S)属于营养不良型,患者多伴有脊柱椎体发育畸形,椎弓根形态改变,甚至影响患者的心肺功能^[4]。同时此类型患者多伴有外观畸形,严

重影响患者心理健康^[5]。NF1-S脊柱侧凸进展速度较快,保守治疗效果不佳,侧凸矫形手术已成为NF1-S患者的有效治疗方法^[6]。目前,椎弓根内固定系统是侧凸矫形的主流方式,因椎弓根螺钉有良好的抗拔出与抗椎体旋转能力,使其在矫形方面具有可靠表现^[7]。而NF1-S患者常因严重椎体旋转、椎弓根狭窄等解剖异常,增加术中置钉难度,导致螺钉误置率高^[8-9]。椎弓根螺钉误置不仅可能造成脊髓、神经根及硬脊膜受损,还会引起主动脉、食道等周围组织器官损伤^[10-13]。因此提高椎弓根螺钉置入精确性与避免术中严重并发症是术者一直追求的目标。大量研究数据表明相较于传统置钉技术,计算机导航、3D打

* 基金项目:国家自然科学基金项目(81902270)。[△] 通信作者, E-mail: chenhuanxiong86@163。

印导向模板及术中 3D 超声导航等能有效提高椎弓根螺钉置入的精准性,降低椎弓根及椎体的穿透率,并减少严重并发症发生^[14-16]。本文将系统综述 NF1-S 患者椎弓根及椎体旋转解剖及形态学特点、术中并发症及各种置钉方式的优缺点,从而为脊柱矫形外科医生安全置入椎弓根螺钉提供参考和指导,推动该领域治疗水平的不断提升。

1 NF1-S 解剖特点

1.1 NF1-S 椎弓根解剖特点

研究发现营养不良脊柱侧凸的椎弓根异常率为 70%,高于非营养不良脊柱侧凸的 59%,且将椎弓根形态分为 A、B、C、D、E 型,其中 B 型松质通道 2~4 mm;C 型松质通道 < 2 mm,完全皮质通道 ≥ 2 mm;D 型皮质通道 < 2 mm,E 型无通道,NF1-S 患者椎弓根异常总患病率高达 67%,顶椎区(87%)是异常椎弓根最集中的区域^[17]。同时,HATAKENAKA 等^[18]测量脊柱侧凸患者第 1 胸椎至第 3 腰椎两侧椎弓根:内径最小和最大直径为 3.7 mm 和 4.7 mm,外径的最小和最大直径为 4.6 mm 和 5.3 mm。上述研究均提示,NF1-S 患者椎弓根存在明显异常,相较于其他部位胸椎椎弓根更狭窄,椎弓根螺钉误置风险更高,因此,为提高置钉安全性术者术前应增加对胸椎椎弓根异常解剖的重视。

1.2 椎体旋转解剖特点

NF1-S 是脊柱三维畸形,其中椎体旋转是引起三维畸形的主要原因之一^[19]。WINTER 等^[20]研究表明 NF1-S 患者顶椎区存在椎体旋转,且该旋转角度对患者手术及预后有重大影响。RAJASEKARAN 等^[8]认为 NF1-S 患者顶椎区旋转较青少年特发性脊柱侧凸更明显,且顶椎区椎体旋转 NF1-S 发生相关性更强。同时,SARWAHI 等^[21]对顶椎区椎体旋转解剖结构及椎弓根螺钉置入进一步研究表明,顶椎区椎弓根变异率远高于椎体(22.7% vs. 1.3%),且在异常椎弓根中,103 颗椎弓根螺钉中有 41 颗(39.8%)错位。因此,脊柱外科医生术前充分了解 NF1-S 患者顶椎区旋转的异常解剖结构,有利于合理安排手术规划并减少术中置钉并发症^[22]。

2 椎弓根螺钉误置并发症

2.1 椎弓根螺钉误置可造成脊髓与神经系统损害

NF1-S 患者椎体旋转及椎弓根变异率明显高于青少年特发性脊柱侧凸,导致其椎弓根螺钉误置率增高^[23]。而在 NF1-S 矫形术中,椎弓根螺钉误置可导致脊髓与神经系统受损,严重时可导致灾难性后果,高位受损可能致使呼吸心跳停止甚至死亡。CHEN 等^[24]通过研究发现 177 例重度脊柱侧凸手术患者有 58 例(32.8%)患者发生术中诱发电位,有 22 例(12.4%)患者发生术后神经系统并发症。因此,术中

尽可能提高椎弓根螺钉置入的精准度,可减少脊髓及神经根系统并发症。

2.2 椎弓根螺钉误置可导致主动脉及食管损害

脊柱侧凸矫形术中椎弓根螺钉的误置不仅会引起神经系统损伤,而且也会损伤主动脉与食管。从解剖的角度来讲脊柱侧凸患者的食管更靠近上胸椎,前皮质穿孔可导致食管损伤^[10]。ZHANG 等^[25]认为在左胸椎侧凸患者胸主动脉向右侧移动,极易因右椎弓根螺钉插入,损伤主动脉。有研究指出,在矫形术中使用直径超过 35 mm 的椎弓根螺钉^[25],椎体皮质前穿孔会导致食管损伤,应尽可能避免这种不寻常潜在的严重并发症。同时,重度脊柱侧凸主动脉伴随并依附于脊柱的异常曲线,并向外侧和后侧位移加大,螺钉误置时有可能发生主动脉的损伤^[11,26]。因此,术者在 NF1-S 矫形术中置钉时需要充分了解椎体附近组织解剖关系,从而减少患者主动脉与食管损害,增加手术安全性。

2.3 椎弓根螺钉误置可造成硬脊膜损害

在 NF1-S 患者脊柱侧凸矫形术中,椎弓根螺钉误置不仅会发生脊髓、神经根、血管、食管受损,还可能引起硬脊膜受损。SIAL 等^[27]认为硬脊膜扩张症的患病率与 NF1-S 有明显的关联,且有 69% 的硬脊膜扩张发生在 NF1-S 患者中,扩张区域的硬脊膜非常薄且脆弱,会不断地侵蚀周围的骨骼结构,椎体和椎弓根畸形程度与硬脊膜扩张程度呈正比,置钉难度也随之上升^[28]。NEIFERT 等^[7]通过对大量 NF1-S 患者术中及术后并发症数据分析表示非神经系统并发症发生率约为 14%,其中主要是脑脊液漏。然而,GIORGI 等^[29]报道了 1 例脊柱侧凸矫形术后,因脑脊液漏需术后翻修病例。因此,硬脊膜损害所造成的脑脊液漏并未引起神经系统并发症,但在行矫形术中也应尽量避免因椎弓根螺钉误置穿破螺钉通道,导致硬脊膜破裂,引起相应的手术并发症^[13]。

3 置钉方法与置钉安全

3.1 传统置钉方法

截至目前国内外报道传统椎弓根螺钉置入的方法有很多,其中较为常见的是徒手技术、透视辅助技术与漏斗技术等置钉方法。PERNA 等^[30]、KIM 等^[31]、CUI 等^[32]表示在使用徒手技术置钉时,胸椎椎弓根置钉时应选择上关节面的下缘、横突的内侧缘及关节间肌形成的三角形中间,第 7 胸椎以上节段置钉点的选择多位于椎弓根外侧和下壁,第 7~12 胸椎置钉点多位于椎弓根内侧与上壁,腰椎置钉时多选择关节间肌与横突交界处,同时,在置钉初始阶段使用椎弓根探头球形触角,在插入椎体内部椎弓根的过程中,充分触诊 5 个骨边界:底部、内侧、外侧、上壁和下壁,据触诊结果及时调整置钉头尾、内外倾角,尽可能地避免

损伤脊髓与神经根。在脊柱侧凸患者中因其椎弓根解剖结构变异,使用徒手技术置钉仍具有较高挑战性。MODI 等^[33]研究认为徒手技术在 NF1-S 患者脊柱侧凸矫形术中椎弓根螺钉误置率(使用 CT 评估)为 27%,同时刘臻等^[34]研究表示使用透视辅助技术置钉总穿破率仅为 17.6%。通过漏斗技术进行置钉,术后对其评估得出总穿破率为 18.3%^[35],因此,传统置钉方式精确性有待提高^[36]。随着计算机导航、机器人、3D 打印导向模板等新型辅助置钉技术的应用,NF1-S 的手术治疗方式及预后也得到改善。

3.2 计算机导航辅助置钉

计算机导航技术依托术中影像,实时构建出三维立体模型,为手术提供重要的参考。计算机导航技术可以根据不同的原理和应用进行分类,主要包括光学导航、磁导航和超声导航等类型。GONZÁLEZ-VARGAS 等^[37]通过研究发现计算机导航辅助置钉在椎弓根螺钉置入过程中提供实时三维影像用以参考,相较于传统置钉方法提高了置钉精准度。有研究指出在矫形术中徒手置钉椎弓根错位率为 4.2%,O 型臂辅助则为 1.6%,使用导航技术在减少矫形手术时间及射线的同时,还可以使置钉的精准度提高^[38]。导航辅助置钉相较于传统方法确有优势,但是导航辅助置钉并非万无一失,其过度依赖于置钉过程中的精准导航提示,一旦导航失准继续置钉则会发生不可挽回的严重后果。本研究团队通过研究表明在置钉的过程中,由于脊柱本身的非固定性,椎体会因为微小的运动与导航参考架间产生相对位移,同时因术中使用的器械形状变化、导航球上溅射的血液等,患者的呼吸和胸廓的浮动在进行透视扫描时会产生伪影,以及光路的遮挡等原因均会影响导航系统的精准性^[39-40]。针对以上情况,操作时可选取较为稳定的髂骨置入导航参考架,术中钉道制备及置钉时,避免因过度暴力而使脊柱产生形变导致导航漂移。同时,本课题组研究结果表示在脊柱侧凸患者的手术置钉过程中,使用定位针导航实时校准技术相较于单纯导航辅助置钉,能够明显提高置钉的精准度,减少并发症。

随着机器人辅助置钉技术不断发展,脊柱手术机器人辅助置钉已经逐渐成为当今手术导航领域的新趋势,在极大地降低了手术的难度和风险的同时,也有效减少了并发症的发生。FAN 等^[41]分析 3 种辅助技术对脊柱侧凸矫形置入椎弓根螺钉精准度的差异,分为脊柱机器人(A 组)、钻孔导向模板(B 组)、CT 导航系统(C 组),临床可接受的螺钉植入准确率分别为 96.0%、90.6%与 93.0%。A 组与其余两组比较虽未能减少手术时间,但却减少了术中辐射剂量,同时螺钉植入的精准度方面有明显提高。但是,ZHANG 等^[42]通过分析认为机器人辅助置钉时,重度椎体旋转

(Ⅲ~Ⅳ)是影响其置钉精准度的危险因素。同时,ZHANG 等^[43]认为在脊柱长节段、长距离使用机器人辅助置钉时受其距离跟踪器影响,是导致置钉精准度下降的危险因素,在使用时应注意该问题。虽然导航辅助下置钉确实提高了置钉的精准度,但导航设备造价昂贵、学习曲线长等,失准时可增加螺钉误置率。机器人辅助置钉相较于导航可以提高置钉精确性,但机器人辅助置钉设备使用成本更高,医院及患者经济负担较大^[36]。3D 打印导向模板新型技术的问世,使医院及脊柱外科医生在辅助置钉设备选择上拥有了更多的选择。

3.3 3D 打印导向模板置钉

骨科手术领域中,3D 打印模板的应用已经非常普遍,导向模板技术也逐渐获得到更多脊柱外科医生的认可。在术中,利用导板上的孔洞,准确地找到椎弓根的入钉点,并选择合适大小的椎弓根螺钉进行置入^[44]。DING 等^[45]研究认为个性化数字手术规划和精确执行的 3D 打印导向模板在治疗重度脊柱侧凸矫形手术方面是可行的、有效的,并且易于推广。JIANG 等^[46]、LIANG 等^[47]通过研究发现在脊柱侧凸矫形术中 3D 打印导向模板与徒手技术置钉比较,3D 打印导向模板较徒手技术的精准度更高,并且手术时间及矫正率无明显差异。在 PIJPKER 等^[48]的研究结果中导向模板技术与导航系统辅助相比较在置钉精准度方面无明显区别。通过个性化设计的导向模板,在保证置钉精准度的情况下,可降低手术风险,减少手术时间及出血^[49]。但为了保证 3D 打印模板能紧密贴合椎体表面并实现精准置钉,手术中需要将骨性结构大量显露并剥离软组织,这一过程可能会增加手术的复杂性和患者的创伤,导致术后恢复时间延长,并提高了并发症的发生风险^[50]。同时,导向模板的制作过程需要一定的时间,导致患者的住院时间延长,增加了围手术期费用^[51]。随着无辐射的 3D 超声引导下椎弓根螺钉植入技术的研究深入,未来辅助置钉的方式将会拥有更多选择。

3.4 3D 超声导航下置钉

3D 超声可以通过重建椎体表面来提供置钉引导,将术前椎体模型注册到该表面进行定位,并将 3D 超声应用于导航中,将人类椎骨幻影通过 3D 打印,并使用基于动作捕捉的 3D 超声导航系统进行扫描而进行图像配准,目前已在动物脊柱上实现精准置钉^[16]。CHAN 等^[52]研究发现一种可用于脊柱后路手术中置钉的 3D 超声导航系统,并进行了幻影实验,该导航系统能够实现术前 CT 扫描模型与术中 3D 超声图像的配准,具有较高的精准度和快速性。该导航系统理论上可减少患者及术者接受电离辐射的剂量,在脊柱后路手术中具有潜在的应用前景,但是因该系统

在动物及人体置钉操作中尚未有大量数据积累,所以 3D 超声导航下置钉技术仍需要进一步的研究验证与改进。

3.5 矫形效果与安全性

在 PUSHPA 等^[9] 研究中发现 NF1-S 患者在顶椎区椎弓根解剖结构变异率高,危及椎弓根螺钉精准置入。GUZEK 等^[53] 通过对脊柱侧凸患者顶椎区凹侧椎弓根进行测量,发现有一半患者无法很好地容纳椎弓根螺钉。LYU 等^[54] 认为在 NF1-S 患者与青少年特发性脊柱侧凸患者通过一期后路手术治疗可以获得相似的矫形治疗效果,且 NF1-S 因其硬脊膜扩张和薄椎弓根可能使椎弓根螺钉放置更具有挑战性。同时,LARSON 等^[55]、WANG 等^[56] 在脊柱侧凸患者置钉数量及不同置钉策略的研究中发现,低密度置钉和高密度置钉获得的冠状曲线校正百分比是等效的;跳跃式与连续性置钉,冠状面和矢状面矫形结果均令人满意。因此,在 NF1-S 患者行矫形术时,在保证矫形效果的同时,可行跳跃式置钉策略,通过减少椎弓根螺钉置入数量,从而尽可能减少术中并发症。

4 展 望

椎弓根螺钉在生物力学方面展现出更为优越的性能,能够提供更可靠的侧凸矫正效果。如果术中不当操作,有可能对脊髓、神经根、硬脊膜、主动脉及食管等重要结构造成损害。因此,术前深入了解和熟悉不同脊柱侧凸患者椎体旋转、异变椎弓根分型及周围内脏结构的解剖与形态学是至关重要的。同时,降低螺钉穿破率、减少术中并发症,以及提升患者远期生存质量,是脊柱外科医生始终追求的目标。多项研究证实,在手术过程中应用数字化导航、机器人技术及导向模板技术,可以明显提高椎弓根螺钉置入的精确性,并有效减少术中并发症的发生率,但在使用数字化辅助置钉时应注意尽量避免因导航失准所带来的危害。在未来的研究中,应致力于研发术中机器人导航和 3D 超声导航系统,提高导航精准性与稳定性,并努力缩短 3D 打印导向模板的制作周期,通过不断地研究和创新,推动 NF1-S 等脊柱侧凸矫形手术技术的不断进步和发展。

参考文献

[1] MATTHIES C, RAMPELTSHAMMER E, BREUN M. Neurofibromatosis [J]. Fortschr Neurol Psychiatr, 2023, 91(5): 213-232.

[2] HEYDE C E, VÖLKER A, VON DER HÖH N H, et al. Spinal deformity in neurofibromatosis type 1 [J]. Orthopade, 2021, 50(8): 650-666.

[3] ZHAO J, MENG Y, MA J, et al. Sectional cor-

rection technique in dystrophic scoliosis secondary to neurofibromatosis type 1: a comparison with traditional 2-Rod correction technique [J]. World Neurosurg, 2022, 167: e507-514.

- [4] ZHANG Z, SONG Z, YANG X, et al. Is there a correlation between Cobb angle and pulmonary function tests at 2-year follow-up in patients with severe spinal deformity treated by posterior vertebral column resection? [J]. Clin Spine Surg, 2022, 35(5): E483-489.
- [5] DOMON-ARCHAMBAULT V, GAGNON L, BENOÎT A, et al. Psychosocial features of neurofibromatosis type 1 in children and adolescents [J]. J Child Neurol, 2018, 33(3): 225-232.
- [6] SURESH K V, XU A L, GROVES M L, et al. Spinal screening, malignancy, medical therapy, and surgical correction of deformity in pediatric patients with neurofibromatosis type 1: a systematic review [J]. J Pediatr Orthop B, 2022, 31(6): 572-582.
- [7] NEIFERT S N, KHAN H A, KURLAND D B, et al. Management and surgical outcomes of dystrophic scoliosis in neurofibromatosis type 1: a systematic review [J]. Neurosurg Focus, 2022, 52(5): E7.
- [8] RAJASEKARAN S, PUSHPA B T, ANAND K, et al. The phenomenon of vertebral body drift in neurofibromatosis and its implications for surgical safety [J]. Eur Spine J, 2022, 31(6): 1343-1348.
- [9] PUSHPA B T, RAJASEKARAN S, ANAND K, et al. Anatomical changes in vertebra in dystrophic scoliosis due to neurofibromatosis and its implications on surgical safety [J]. Spine Deform, 2022, 10(1): 159-167.
- [10] MAROUBY S, JEANDEL C, M'SABAH D L, et al. Esophageal perforation caused by a thoracic pedicle screw [J]. Eur Spine J, 2021, 30(7): 2040-2045.
- [11] YANG H, LIU Z, GUAN L, et al. Is the risk of aorta injury or impingement higher during correction surgery in patients with severe and rigid scoliosis? [J]. World Neurosurg, 2020, 139: e626-634.
- [12] LOVI A, MANFRONI F, LUCA A, et al. Delayed postoperative cervical spinal cord ischemic lesion after a thoracolumbar fusion for

- syndromic scoliosis; a case report and systematic review of the literature [J]. *Childs Nerv Syst*, 2022, 38(5): 1011-1015.
- [13] JIN M, LIU Z, LIU X, et al. Does intraoperative navigation improve the accuracy of pedicle screw placement in the apical region of dystrophic scoliosis secondary to neurofibromatosis type 1: comparison between O-arm navigation and free-hand technique [J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(6): 1729-1737.
- [14] SHAO X, HUANG Z, YANG J, et al. Efficacy and safety for combination of t-EMG with O-arm assisted pedicle screw placement in neurofibromatosis type 1 scoliosis surgery [J]. *J Orthop Surg Res*, 2021, 16(1): 731.
- [15] HOU C, YANG H, CHEN Y, et al. Comparison of robot versus fluoroscopy-assisted pedicle screw instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis surgery: a retrospective study [J]. *Front Surg*, 2022, 9: 1085580.
- [16] CHAN A, COUTTS B, PARENT E, et al. Development and evaluation of CT-to-3D ultrasound image registration algorithm in vertebral phantoms for spine surgery [J]. *Ann Biomed Eng*, 2021, 49(1): 310-321.
- [17] LI Y, LUO M, WANG W, et al. A computed tomography-based comparison of abnormal vertebrae pedicles between dystrophic and nondystrophic scoliosis in neurofibromatosis type 1 [J]. *World Neurosurg*, 2017, 106: 898-904.
- [18] HATAKENAKA T, OBA H, IKEGAMI S, et al. Comparison of differences and random errors in pedicle diameter measurements between MRI and CT: observational study of 315 pedicles in Lenke type 1 adolescent idiopathic scoliosis patients [J]. *Spine J*, 2022, 22(6): 1002-1011.
- [19] GAO R, GUO D, ZHANG X, et al. Surgical treatment of the intraspinal Rib Head dislocation in children with dystrophic scoliosis secondary to type 1 neurofibromatosis [J]. *J Pediatr Orthop*, 2022, 42(3): e242-249.
- [20] WINTER R B, MOE J H, BRADFORD D S, et al. Spine deformity in neurofibromatosis. A review of one hundred and two patients [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1979, 61(5): 677-694.
- [21] SARWAHI V, WENDOŁOWSKI S F, LO Y, et al. End Vertebra versus apical vertebra: where are we more likely to misplace in spine deformity? [J]. *J Pediatr Orthop*, 2020, 40(2): 53-59.
- [22] GAO R, BAI Y, ZHANG X, et al. Outcomes and safety of traditional growing rod technique in the treatment of early-onset dystrophic scoliosis secondary to type 1 neurofibromatosis with intraspinal rib head dislocation in children [J]. *J Pediatr Orthop*, 2023, 43(3): e223-229.
- [23] ALLAM A M, SCHWABE A L. Neuromuscular scoliosis [J]. *PM R*, 2013, 5(11): 957-963.
- [24] CHEN J, SHAO X X, SUI W Y, et al. Risk factors for neurological complications in severe and rigid spinal deformity correction of 177 cases [J]. *BMC Neurol*, 2020, 20(1): 433.
- [25] ZHANG T, QIU Y, ZHU Z, et al. Potential risk of thoracic aorta injury from excessively long right pedicle screws in patients with left thoracic scoliosis: a computed tomography image study [J]. *World Neurosurg*, 2021, 145: e177-183.
- [26] MINOR M E, MORRISSEY N J, PERESS R, et al. Endovascular treatment of an iatrogenic thoracic aortic injury after spinal instrumentation: case report [J]. *J Vasc Surg*, 2004, 39(4): 893-896.
- [27] SIAL M, GEORGE K J. A review of spinal lesions in neurofibromatosis type 1 in a large neurofibromatosis type 1 center [J]. *World Neurosurg*, 2023, 169: e157-163.
- [28] ELSAYED A A, RAJABIAN A, NABI A, et al. Thoracic meningocele in patients with neurofibromatosis type 1: a review of literature with illustration of a novel surgical challenge, and insights from histology [J]. *Interdiscip Neurosurg*, 2022, 2022: 30.
- [29] GIORGI P D, SCHIRÒ G R, CAPITANI P, et al. Surgical pathway proposal for severe paralytic scoliosis in adolescents with myelomeningocele [J]. *Childs Nerv Syst*, 2021, 37(7): 2279-2287.
- [30] PERNA F, BORGHI R, PILLA F, et al. Pedicle screw insertion techniques: an update and review of the literature [J]. *Musculoskelet Surg*, 2016, 100(3): 165-169.
- [31] KIM Y J, LENKE L G, BRIDWELL K H, et

- al. Free hand pedicle screw placement in the thoracic spine: is it safe? [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29(3):333-342.
- [32] CUI X G, CAI J F, SUN J M, et al. Morphology study of thoracic transverse processes and its significance in pedicle-rib unit screw fixation [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2015, 28(2):E74-77.
- [33] MODI H N, SUH S W, FERNANDEZ H, et al. Accuracy and safety of pedicle screw placement in neuromuscular scoliosis with free-hand technique [J]. *Eur Spine J*, 2008, 17(12):1686-1696.
- [34] 刘臻, 邱勇, 李洋, 等. O-arm 联合三维导航系统在 I 型神经纤维瘤病合并营养不良性脊柱侧凸患者后路矫形手术中的临床应用 [J]. *中华外科杂志*, 2017, 55(3):186-191.
- [35] KWAN M K, CHIU C K, GANI S M A, et al. Accuracy and safety of pedicle screw placement in adolescent idiopathic scoliosis patients: a review of 2020 screws using computed tomography assessment [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2017, 42(5):326-335.
- [36] LI C, LI H, SU J, et al. Comparison of the accuracy of pedicle screw placement using a fluoroscopy-assisted free-hand technique with robotic-assisted navigation using an o-arm or 3d c-arm in scoliosis surgery [J]. *Global Spine J*, 2024, 14(4):1337-1346.
- [37] GONZÁLEZ-VARGAS P M, CALERO FÉLIX L, MARTÍN-GALLEGO Á, et al. Evaluation of the implantation of transpedicular screws in spinal instrumentation with free-hand technique and navigation-assisted with intraoperative computed tomography: an analytical-positional study [J]. *Neurocirugia (Astur; Engl Ed)*, 2022, 33(2):71-81.
- [38] SIELATYCKI J A, MITCHELL K, LEUNG E, et al. State of the art review of new technologies in spine deformity surgery-robotics and navigation [J]. *Spine Deform*, 2022, 10(1):5-17.
- [39] 何贤波, 陈焕雄, 孟志斌. 术中导航校准技术辅助下青少年特发性脊柱侧凸顶椎区置钉精确性研究 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2022, 32(9):795-804.
- [40] 杨雪健, 陈焕雄, 李国军. 青少年特发性脊柱侧凸矫形术中置钉安全性的研究进展 [J]. *海南医学院学报*, 2023, 29(11):860-865.
- [41] FAN Y, PENG DU J, LIU J J, et al. Radiological and clinical differences among three assisted technologies in pedicle screw fixation of adult degenerative scoliosis [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1):890.
- [42] ZHANG J N, FAN Y, HAO D J. Risk factors for robot-assisted spinal pedicle screw malposition [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1):3025.
- [43] ZHANG Q, FAN M X, HAN X G, et al. Risk factors of unsatisfactory robot-assisted pedicle screw placement: a case-control study [J]. *Neurospine*, 2021, 18(4):839-844.
- [44] PAN A, DING H, HAI Y, et al. The value of three-dimensional printing spine model in severe spine deformity correction surgery [J]. *Global Spine J*, 2023, 13(3):787-795.
- [45] DING H, HAI Y, ZHOU L, et al. Clinical application of personalized digital surgical planning and precise execution for severe and complex adult spinal deformity correction utilizing 3d printing techniques [J]. *J Pers Med*, 2023, 13(4):602.
- [46] JIANG C H, SHI Y, SUN Y M, et al. Using a 3D navigation template to increase the accuracy of thoracic pedicle screws in patients with scoliosis [J]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(7):756.
- [47] LIANG W, HAN B, HAI J J, et al. 3D-printed drill guide template, a promising tool to improve pedicle screw placement accuracy in spinal deformity surgery: a systematic review and meta-analysis [J]. *Eur Spine J*, 2021, 30(5):1173-1183.
- [48] PIJPKER P A J, KUIJLEN J M A, TAMÁSI K, et al. The accuracy of patient-specific spinal drill guides is non-inferior to computer-assisted surgery: the results of a split-spine randomized controlled trial [J]. *J Pers Med*, 2022, 12(7):1084.
- [49] 王力航, 汤倩, 陈啟鹄, 等. 新型点状接触式椎弓根导航模板在脊柱侧弯矫形术中辅助植钉的应用研究 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2023, 37(6):700-705.
- [50] LUO M, WANG W, YANG N, et al. Does Three-dimensional printing plus pedicle guider technology in severe congenital (下转第 3644 页)